



## بررسی تجربی جذب انرژی پروفیل‌های مربعی تحت بارگذاری دندانه‌ای چندگانه

سید جعفر روزگار\*، محمد رضا کشاورز، سید حسن عصایی

دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی شیراز

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۳ مرداد ۱۳۹۶  
بازنگری: ۶ آبان ۱۳۹۶  
پذیرش: ۷ آذر ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۱۳ آذر ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

مطالعه‌ی تجربی  
جذب انرژی  
پروفیل جدارنازک  
بارگذاری دندانه‌ای  
دندانه‌گذاری چندگانه

**چکیده:** در این تحقیق به مطالعه تجربی جذب انرژی و تغییر شکل پروفیل‌های جدارنازک با سطح مقطع مربعی تحت بارگذاری دندانه‌ای چندگانه پرداخته شده است. هدف اصلی از انجام این تحقیق بررسی اثر تعداد دندانه‌ها و همچنین قطر و فاصله بین دندانه‌ها بر پارامترهای جذب انرژی است. در ابتدا پروفیل‌های مربعی آلومینیوم با طول مشخص تهیه شد و همچنین یک مجموعه دندانه قابل تنظیم نیز جهت اعمال بارگذاری دندانه‌ای چندگانه ساخته شد. سپس بارگذاری شبه استاتیکی با نرخ بارگذاری ثابت بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. در نحوه بارگذاری، نمونه‌ها بین یک فک نسبتاً صلب و یک مجموعه‌ی دندانه قابل تنظیم قرار گرفت. نمودارهای نیرو-جابجایی نمونه‌ها به دست آمد و پارامترهای جذب انرژی محاسبه شد. مقایسه‌ی نتایج تجربی در حالت یک‌دندانه و دودندانه نشان دهنده افزایش قابل توجه جذب انرژی حالت دودندانه نسبت به یک‌دندانه بود. برای بارگذاری با دو دندانه، با افزایش فاصله دندانه‌ها از هم، نمودارهای نیرو-جابجایی به مراتب بالاتر از حالت یک دندانه قرار گرفت و به حالت دو دندانه مجزا نزدیک شد. همچنین با افزایش قطر و فاصله بین دندانه‌ها به دلیل ایجاد لولای پلاستیک بزرگتر، میزان جذب انرژی حدود ۲۰ تا ۶۰ درصد افزایش یافت.

### ۱- مقدمه

جاذب‌های انرژی عناصر ساختاری مصرفی هستند که بخشی یا تمام انرژی جنبشی وارده از خارج یک سازه به آن را، به سایر انواع انرژی تبدیل می‌کنند. انرژی تبدیل یافته به دو صورت بازگشت‌پذیر، مانند انرژی فشار در سیالات تراکم‌پذیر و انرژی کرنشی الاستیک در جامدات و یا برگشت‌ناپذیر مانند انرژی تغییر شکل پلاستیک می‌باشد [۱]. در طراحی جاذب‌های انرژی یک‌بار مصرف، هدف جذب حداکثر انرژی ناشی از ضربه طی یک فرایند بازگشت‌ناپذیر توسط سازه به منظور جلوگیری از انتقال ضربه و رسیدن صدمه به افراد و سایر تجهیزات است. از آنجا که سازه‌های جدارنازک دارای وزن کم، پایداری بهتر در حین لهیدگی، قیمت ارزان، قابلیت دسترسی آسان و پارامترهای جذب انرژی مطلوب هستند، به عنوان یکی از بهترین سیستم‌های جذب انرژی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲].

مفهوم جذب انرژی و جلوگیری از انتقال ضربه در یک محدوده‌ی گسترده از علوم مهندسی و در کاربردهای مختلف از قبیل طراحی مخازن [۳]، برخورد وسایل نقلیه [۴ و ۵]، طراحی موانع برخورد [۶]، طراحی راکتور ایمن [۷]، محافظ ضربه در پل‌ها و جاده‌ها [۸] و بالگردها [۹] به کار می‌رود. انرژی کرنشی ناشی از تغییر شکل پلاستیک در نمونه‌های جدارنازک فلزی می‌تواند در اثر ایجاد چند مکانیزم تغییر شکل مختلف مانند خمش پلاستیک،

انبساط و یا انقباض پلاستیک و پارگی جداره اتلاف گردد که هریک از این مکانیزم‌ها ویژگی‌ها و ظرفیت جذب انرژی خاص خود را دارند [۱۰]. جاذب‌های انرژی انواع مختلفی دارند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به مکانیزم‌های هیدرولیکی، فنرها، لوله‌ها، ستون‌هایی با مقطع چندگوش، مخروط‌های ناقص، لانه‌زنوری‌ها و صفحات ساندویچی اشاره کرد. از این میان سازه‌های جدار نازک از جمله لوله‌ها و پروفیل‌ها با توجه به پارامترهای جذب انرژی مناسب و همچنین سهولت دسترسی به آنها به عنوان متداول‌ترین جاذب‌های انرژی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. عمده‌ترین تغییر شکل‌های شناخته شده در مورد جاذب‌های انرژی جدار نازک شامل تاخوردگی محوری<sup>۱</sup>، پهن شدگی جانبی<sup>۲</sup>، فرورفتگی موضعی جانبی (دندانه‌گذاری)<sup>۳</sup>، گسیختگی محوری<sup>۴</sup> و وارونگی<sup>۵</sup> هستند [۱۱]. در این پژوهش از مکانیزم دندانه‌گذاری به منظور جذب انرژی پروفیل‌های جدارنازک آلومینیومی استفاده شده است که در ادامه به برخی از تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی جذب انرژی به کمک دندانه‌گذاری اشاره می‌شود.

جانسون [۱۲] با انجام آزمایشات متعدد، روابطی تجربی برای تعیین

- 1 Folding
- 2 Flattening
- 3 Indentation
- 4 Splitting
- 5 Inversion

و مورد بررسی قرار می‌گیرد. البته بایستی توجه داشت که در بسیاری از کاربردهای عملی نیز بروز بارگذاری دندانهای چند گانه اجتناب ناپذیر است. در دندانگذاری با دو (یا چند) دندان نزدیک به هم، به دلیل پیچیدگی بیشتر تغییر شکل و همچنین برهمکنش تأثیر دندانها بر روی هم نیاز به بررسی دقیق رفتار جاذب انرژی می‌باشد. لذا در این مقاله با انجام مطالعات تجربی به بررسی پارامترهای جذب انرژی و نحوه تغییر شکل پروفیل‌های آلومینیومی جدارهای نازک مربعی تحت بارگذاری دندانگذاری با یک و دو دندان پرداخته می‌شود. همچنین اثر سه پارامتر که شامل تعداد دندان، قطر دندان و فاصله بین دندانها می‌باشد بر روی جذب انرژی پروفیل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- مواد و آزمایش‌های تجربی

پروفیل‌های مورد استفاده از جنس آلومینیوم بوده و سطح مقطع آن مربعی و به ضلع ۳۵ میلی‌متر می‌باشد. این پروفیل‌ها با ضخامت  $1/6$  میلی‌متر طبق شرط  $(t/a < 0.1)$  که در آن  $a$  طول ضلع و  $t$  ضخامت نمونه است، یک سازه‌ی جدارنازک می‌باشند. از آنجا که یکی از اهداف این تحقیق، بررسی فاصله بین دندانها در بارگذاری دندانهای است، طول نمونه ۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد تا بتوان حالت‌های مختلف فاصله بین دندانها را بررسی کرد.

به منظور طراحی مجموعه‌ی دندانها از میله‌های توپر فولادی که نسبت به نمونه صلب هستند استفاده شد. قطر این میله‌ها ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر انتخاب گردید. از آنجا که به دلیل بررسی تغییر شکل‌های بزرگ و جذب انرژی بیشتر نیاز است که دندان در نمونه نفوذ زیادی داشته باشد، با جوشکاری میله‌ها به یک نبشی فولادی، اجازه فرورفتن دندان در پروفیل آلومینیومی داده شد. به دلیل این که یکی از پارامترهای مورد بررسی فاصله بین دندانهاست باید مجموعه‌ی دندان ساخته شده قابلیت جابه‌جایی داشته باشد، از یک پایه‌ی کشویی قابل تنظیم استفاده شد. در شکل ۱ مجموعه دندانهای استفاده شده در آزمایش‌ها نشان داده شده است.

پس از آماده شدن نمونه‌ها و مجموعه‌ی دندان، به کمک دستگاه تست کشش یونیورسال Zwick Z250، آزمایش‌های تجربی انجام شد. در تمامی آزمایش‌ها نمونه‌ها بین یک فک صلب و مجموعه دندان قرار گرفت و بارگذاری به صورت شبه استاتیکی و با نرخ بارگذاری ثابت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. پیش‌روی دندانها در نمونه تا صلب شدن نمونه‌ها ادامه پیدا کرد. برای اطمینان از صحت نتایج آزمایشگاهی، هر حالت آزمایش سه‌بار

نیروی بیشینه و تغییر شکل ایجاد شده در حین فرایند دندانگذاری ارائه نمود در نهایت به محاسبه‌ی انرژی جذب شده توسط هندسه‌های متفاوت از قبیل کره، استوانه و مخروط پرداخت. شیم و استرانگ [۱۳] به بررسی بارگذاری فروپاشی پلاستیک و رفتار پس از فروپاشی لوله‌های جدار نازک با جنس‌های آلومینیوم، استیل و برنج تحت بارگذاری دندانهای پرداختند. در این آزمایش‌ها لوله‌ها را بین دندانهای استوانه‌ای با شعاع مختلف قرار داده و با در نظر گرفتن تغییر شکل بزرگ بارگذاری فشاری اعمال گردید. لو [۱۴] به بررسی رفتار تیوبهای فولادی تحت بارگذاری دندانگذاری دوسویه پرداخت. در این بارگذاری با استفاده از دو دندان گوه‌ای شکل از دو سمت، مرکز لوله را تحت بارگذاری قرار دادند. نمودارهای نیرو- تغییر مکان به دست آمد و یک رابطه تجربی با توجه به داده‌های به دست آمده پیشنهاد گردید. ورزیکی و سو [۱۵] به بررسی مقدار نیروی بیشینه، تغییر شکل و انرژی جذب شده لوله‌های تحت بارگذاری ترکیبی دندانگذاری جانبی، گشتاور خمشی و نیروی محوری، بر اساس مطالعات تئوری و آزمایشگاهی پرداختند. یک رابطه تحلیلی برای مسئله تغییر شکل پلاستیک بزرگ لوله‌های تحت بارگذاری مذکور اریه گردید. در تئوری ارائه شده فرض کرنش‌های بزرگ در نظر گرفته شد و از اثرات برشی صرف نظر گردید و روابط برای شرایط مرزی متفاوت به دست آمد. نشان داده شد که نمودار نیرو- تغییر مکان دندانگذاری به شدت تحت تأثیر گشتاور خمشی و/یا نیروی محوری اعمالی می‌باشد. همچنین دیده شد که نتایج به دست آمده با خروجی‌های آزمونهای تجربی تطابق خوبی دارد. کارداراس و لو [۱۶] از روش اجزای محدود برای تحقیق بر روی تغییر شکل بزرگ لوله‌های استوانه‌ای جدار نازک تحت بار نقطه‌ای اعمالی به نقطه وسط دهانه استفاده کردند. مشاهده گردید که نمودار نیرو- تغییر مکان در تمامی حالتها، غیرخطی می‌باشد و کوتاه‌ترین لوله، دارای رفتار کماتشی می‌گردد. همچنین مشاهده گردید که به طور کلی، در جهت محیطی کرنش‌های خمشی و در جهت طولی کرنش‌های غشایی غالب می‌باشند. بروکر [۱۷] در یک مطالعه‌ی عددی روی استوانه‌ی جدار نازک با در نظر گرفتن اثرات طول و قطر لوله، به محاسبه‌ی انرژی جذب شده طی فرایند دندانگذاری پرداخت. آلابی و همکاران [۱۸] یک پژوهش آزمایشگاهی جامع بر روی لوله‌های استیل و آلومینیوم انجام داده که در آن انرژی جذب شده طی فرایندهای چین خوردگی محوری، چین خوردگی جانبی و دندانگذاری محاسبه گردید. حافیظ و المسکری [۱۹] در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی لوله‌های کامپوزیتی با شعاع‌های مختلف، به بررسی اثرات اندازه‌ی دندان، طول و شعاع لوله بر مقدار انرژی جذب شده طی فرایند دندانگذاری پرداختند.

در کلیه پژوهش‌های پیشین تنها به بررسی تأثیر یک دندان در بارگذاری دندانگذاری پرداخته شده است. در برخی مراجع میزان انرژی جذب شده در روش دندانگذاری در مقایسه با روش‌هایی چون پهن‌شدگی جانبی به عنوان یکی از معایب روش دندانگذاری عنوان شده است. در این تحقیق به منظور افزایش میزان جذب انرژی ایده بارگذاری دندانهای چندگانه پیشنهاد

جدول ۱: خواص مکانیکی پروفیل آلومینیوم استفاده شده  
Table 1. The mechanical properties of used aluminum profile

افزایش طول تنش شکست	تنش نهایی	تنش تسلیم	ضریب پواسون	مدول یانگ
۱۴۲ MPa	۱۵۸ MPa	۱۱۰ MPa	۰,۳۲	۶۹,۴ GPa
۷,۸۸ %				

$$SAE = \frac{E_t}{m} = \frac{P_{ave} \delta}{\rho A L} \quad (2)$$

که در این رابطه  $L$  و  $A$  به ترتیب طول و سطح مقطع سازه بوده و  $E_t$  مقدار انرژی کل و  $P$  بار لحظه‌ای بوده که به ترتیب با استفاده از رابطه (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند.

$$E_t = \int_0^\delta P ds \quad (3)$$

$$P_{ave} = \frac{E_t}{\delta} = \frac{\int_0^\delta P ds}{\delta} \quad (4)$$

متغیر  $s$  در روابط ذکر شده محور مختصات در راستای جابه‌جایی است. واحد این پارامتر در این مطالعه بصورت  $J/kg$  در نظر گرفته شده است. این پارامتر در مواردی که وزن سازه برای طراحان مهم است یکی از موثرترین پارامترهای جذب انرژی است.

### اثر بخشی جذب انرژی<sup>۳</sup>

این پارامتر نیز مانند پارامتر انرژی جذب شده ویژه است با این تفاوت که این پارامتر با مقدار انرژی کل بر واحد حجم ارتباط دارد. به منظور بی‌بعد کردن این پارامتر، نسبت گفته شده بر تنش تسلیم  $Y$  تقسیم می‌شود. برای محاسبه این پارامتر از رابطه‌ی (۵) استفاده می‌شود.

$$EEA = \frac{E_t}{VY} = \frac{P_{ave} \delta}{AYL} \quad (5)$$

در این مطالعه با توجه به فرض ثابت بودن چگالی نمونه‌ها، نتایج حاصل از محاسبه این پارامتر و نحوه تغییرات آن مانند پارامتر SAE می‌باشد.

### راندمان نیروی برخورد<sup>۴</sup>

این پارامتر بی بعد به صورت مقدار نیروی میانگین  $P_{ave}$  بر نیروی بیشینه  $P_{cr}$  است. جاذب ایده‌آل جاذبی است که پس از رسیدن به بیشینه نیرو، مقدار نیرو در ادامه جابه‌جایی ثابت بماند. برای محاسبه این پارامتر از رابطه‌ی (۶) استفاده می‌شود.

$$CEF = \frac{P_{ave}}{P_{cr}} \quad (6)$$

مقدار این پارامتر بین صفر تا یک است که هرچه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد جاذب بهتری می‌باشد.

### ظرفیت حمل بار بدون بعد<sup>۵</sup>

همان گونه که از نام این پارامتر مشخص است، پارامتری بی بعد به منظور نشان دادن ظرفیت سازه در حمل بار است. برای محاسبه این پارامتر از رابطه (۷) استفاده می‌شود.



Fig.1. The Set of adjustable-distance cylindrical indenters with diameter of 8, 12, 16 and 20 mm.

### شکل ۱: مجموعه‌ی دندان‌های استوانه‌ای با قطرهای ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر با قابلیت تنظیم فاصله

تکرار و همگرایی نتایج مورد بررسی قرار گرفت. پس از محاسبه انحراف معیار و ضریب تغییرات در هر مجموعه آزمون، آزمون‌های نامناسب مجدداً تکرار شدند. به منظور یافتن خواص مکانیکی پروفیل استفاده شده از تست کشش ساده مطابق با استاندارد ASTM E8 استفاده شد [۲۰]. همچنین با انجام آزمون کوانتومتری گرید آلومینیوم استفاده شده، ۶۰۶۰ تعیین گردید. در جدول ۱ خواص مکانیکی جنس به کار رفته لیست شده است که ضریب پواسون از استاندارد مربوط به آلومینیوم ۶۰۶۰ استخراج شده و سایر خواص از آزمون کشش ساده به دست آمده است.

به منظور بررسی رفتار جذب انرژی نمونه‌های آزمایش شده، لازم است پارامترهای مناسبی که عملکرد جاذب انرژی را از نقطه نظرات مختلف مورد بررسی قرار می‌دهند، تعریف گردد. با فرض اینکه سازه به اندازه  $\delta$  در راستای محور بار اعمالی جابجا شده باشد؛ نیروی لحظه‌ای وارد بر سازه  $P$ ، وزن سازه  $m$ ، حجم و چگالی سازه  $V$  و  $\rho$  باشد، پارامترها بصورت زیر تعریف می‌شوند [۲۱]:

### نسبت پیشروی مؤثر<sup>۱</sup>

به نسبت طول جابجا شده به طول کل سازه نسبت پیشروی مؤثر گفته می‌شود که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$ESR = \frac{\delta}{a} \quad (1)$$

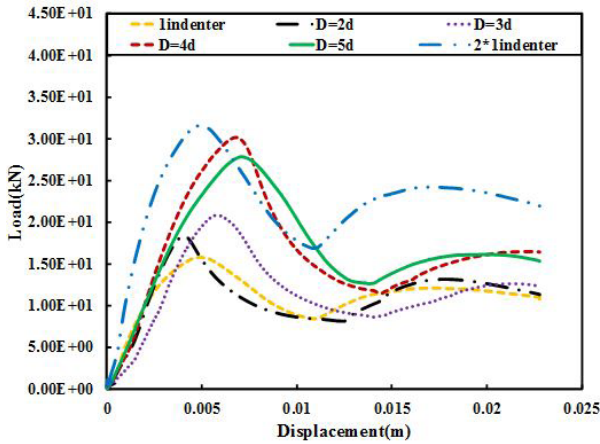
که  $a$  طول ضلع پروفیل پیش از اعمال بارگذاری است. این پارامتر بی بعد می‌باشد که در این مطالعه مقدار آن بین  $0/۶۳-0/۷۱$  در نظر گرفته می‌شود.

### انرژی جذب شده ویژه<sup>۲</sup>

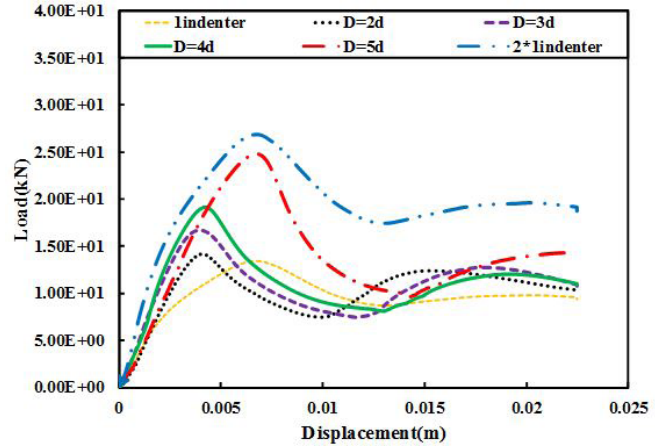
این پارامتر معرف مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم می‌باشد.

- 3 Effectiveness of Energy Absorption (EEA)
- 4 Crush Force Efficiency (CFE)
- 5 Non-dimensional Load-carrying Capacity (NLC)

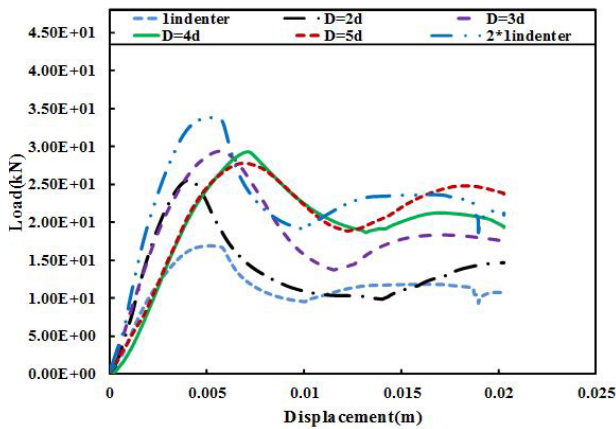
- 1 Effective Stroke Ratio (ESR)
- 2 Specific Absorbed Energy (SAE)



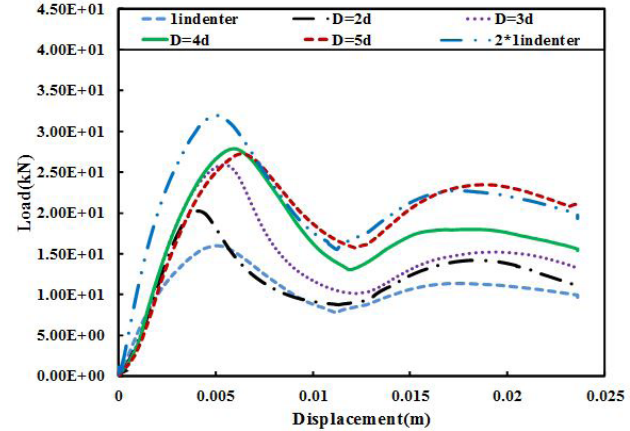
ب) قطر دندان ۱۲ میلی متر



الف) قطر دندان ۸ میلی متر



د) قطر دندان ۲۰ میلی متر



ج) قطر دندان ۱۶ میلی متر

Fig.2. Force-displacement diagram for double-indentation considering different indenters diameter and distance ( $D=2d-5d$ ). a) Indenters diameter=8mm, b) Indenters diameter=12mm, c) Indenters diameter=16mm, d) Indenters diameter=20mm.

شکل ۲: نمودار نیرو-جابجایی برای دندان گذاری دوتایی با در نظر گرفتن قطرهای مختلف دندان و فاصله های ۲d-5d

این پارامتر نیز از پارامترهای بدون بعد در بحث جذب انرژی است که مشابه CFE می باشد با این تفاوت که این پارامتر تمامی نیروها را در نظر می گیرد.

### ۳- نتایج و بحث

پس از آماده سازی نمونه ها، آزمایش های تجربی که شامل بارگذاری به کمک دندان بود انجام و نمودارهای نیرو-جابجایی برای هر نمونه به دست آمد که این نمودارها برای قطرهای ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ میلی متر در شکل های ۲-الف تا ۲-د رسم شده اند.

در این شکل ها  $d$  قطر دندان،  $D$  فاصله مراکز دو دندان است و حالت ۱ indenter مربوط به دندان گذاری با یک دندان و ۲×۱ indenter حالت دندان گذاری با دو دندان مستقل و بدون در نظرگیری تأثیر دو دندان بر روی هم می باشند که عملاً نمودار این حالت با دو برابر کردن نیروی حالت یک دندان به دست آمده است. همانطور که در شکل ۲ دیده می شود برای هر یک از قطرهای با افزایش فاصله بین دو دندان، سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی نسبت به حالت یک دندان افزایش یافته و به حالت دو دندان مجزا (۲×۱ indenter) نزدیک می شود.

$$NLC = \frac{P_{ave}}{M_0} \quad (7)$$

که در این رابطه  $M_0$  گشتاور خمشی تمام پلاستیک<sup>۱</sup> بر واحد طول نیز از رابطه (۸) محاسبه می شود.

$$M_0 = \left(\frac{2Y}{\sqrt{3}}\right)\left(\frac{t^2}{4}\right) \quad (8)$$

که در این رابطه  $t$  ضخامت سازه و  $Y$  تنش تسلیم است.

### نوسان ظرفیت حمل بار<sup>۲</sup>

این پارامتر نوسانات نیروهای لحظه ای را از نیروی میانگین بصورت تجمعی محاسبه می کند:

$$ULC = \frac{\int_0^\delta |P - P_{ave}| ds}{\int_0^\delta P ds} \quad (9)$$

- 1 perfectly plastic bending moment
- 2 Undulation of Load-carrying Capacity) ULC(

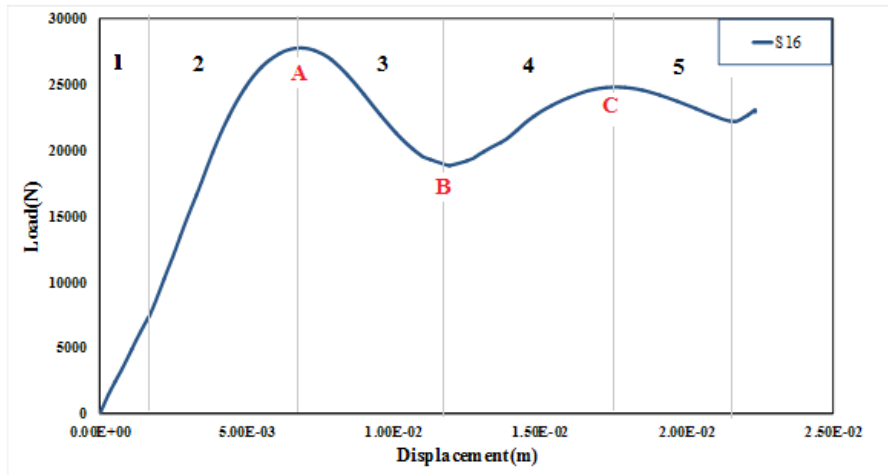


Fig. 3. Up) Force-displacement diagram for specimen  $S_{16}$  under indentation, Down) Deformation of the specimen under loading.  
 شکل ۳: بالا) نمودار نیرو-جابجایی دندان‌گذاری نمونه  $S_{16}$ ، پایین) تغییر شکل نمونه در حین بارگذاری



Fig. 4. The Deformation of the profile during indentation process.  
 شکل ۴: نحوه تغییر شکل پروفیل طی فرایند بارگذاری دندان‌های

**جدول ۲: پارامترهای جذب انرژی برای بارگذاری با یک دندان**

Table 2. Energy absorption properties for single-indentation

نمونه	(d (mm	(m (g	(Et (J	( $\delta$ (m	(Pcr (N	(Pave (N	CFE	SAE	NLC	ULC
P <sub>1</sub>	۸	۱۰۰/۷	۲۱۶	-/۰.۲۲۵	۱۳۴۰۰	۹۶۰۰	-/۷۱۶	۲۱۴۵	۱۱۸/۱	-/۱۵۶
P <sub>2</sub>	۱۲	۱۰۱/۷	۲۵۵	-/۰.۲۲۵	۱۵۸۴۰	۱۱۳۳۳	-/۷۱۵	۲۵۰۷	۱۳۹/۴	-/۱۶۳
P <sub>3</sub>	۱۶	۱۰۰/۸	۲۵۳	-/۰.۲۲۳	۱۵۹۵۰	۱۱۰۰۰	-/۶۷۰	۲۵۱۰	۱۳۵/۳	-/۱۷۸
P <sub>4</sub>	۲۰	۱۰۰/۴	۲۳۱	-/۰.۲۰۳	۱۶۹۰۰	۱۱۳۷۹	-/۶۷۳	۲۳۰۱	۱۳۴/۰	-/۱۷۰

**جدول ۳: پارامترهای جذب انرژی برای بارگذاری با دو دندان با فاصله‌های مختلف دندانها از یکدیگر**

Table 2. Energy absorption properties for double-indentation with different indenters distance

نمونه	d (mm)	D (mm)	m (g)	E <sub>i</sub> (J)	$\delta$ (m)	P <sub>cr</sub> (N)	P <sub>ave</sub> (N)	CFE	SAE	NLC	ULC
S <sub>1</sub>	۸	۱۶	۹۹/۱	۲۵۲	-/۰.۲۵	۱۴۲۰۰	۱۰۱۰۰	-/۷۱۰	۲۵۴۳	۱۲۴/۲	-/۱۹۰
S <sub>2</sub>	۸	۲۴	۱۰۱/۸	۲۶۸	-/۰.۲۵	۱۶۷۰۰	۱۰۷۰۰	-/۶۴۲	۲۶۳۳	۱۳۱/۶	-/۲۰۶
S <sub>3</sub>	۸	۳۲	۱۰۱/۱	۲۷۶	-/۰.۲۵	۱۹۱۰۰	۱۱۰۰۰	-/۵۷۸	۲۷۳۰	۱۳۵/۳	-/۲۱۰
S <sub>4</sub>	۸	۴۰	۱۰۱/۴	۳۴۴	-/۰.۲۵	۲۴۸۰۰	۱۳۸۰۰	-/۵۵۵	۳۳۹۳	۱۶۹/۷	-/۲۴۷
S <sub>5</sub>	۱۲	۲۴	۱۰۱/۲	۲۷۵	-/۰.۲۵	۱۸۴۰۰	۱۱۰۰۰	-/۵۹۸	۲۷۱۷	۱۳۵/۳	-/۲۱۱
S <sub>6</sub>	۱۲	۳۶	۱۰۰/۱	۲۸۹	-/۰.۲۵	۲۰۲۰۰	۱۱۶۰۰	-/۵۷۲	۲۸۸۷	۱۴۲/۷	-/۲۵۲
S <sub>7</sub>	۱۲	۴۸	۱۰۰/۳	۴۱۱	-/۰.۲۵	۳۰۲۰۰	۱۶۴۰۰	-/۵۴۴	۴۰۹۸	۲۰۱/۷	-/۲۶۰
S <sub>8</sub>	۱۲	۶۰	۱۰۰/۱	۴۱۳	-/۰.۲۵	۲۷۸۰۰	۱۶۵۰۰	-/۵۹۴	۴۱۲۶	۲۰۲/۹	-/۲۴۷
S <sub>9</sub>	۱۶	۳۲	۱۰۱/۴	۲۸۹	-/۰.۲۴	۲۰۲۰۰	۱۲۰۰۰	-/۵۹۳	۲۸۵۰	۱۴۷/۶	-/۲۲۶
S <sub>10</sub>	۱۶	۴۸	۱۰۱/۱	۳۵۶	-/۰.۲۴	۲۵۹۰۰	۱۴۴۰۰	-/۵۵۷	۳۵۲۱	۱۷۷/۱	-/۲۳۷
S <sub>11</sub>	۱۶	۶۴	۱۰۱/۵	۴۳۱	-/۰.۲۵	۲۷۹۰۰	۱۷۲۰۰	-/۶۱۸	۴۲۴۶	۲۱۱/۶	-/۲۰۱
S <sub>12</sub>	۱۶	۸۰	۱۰۰/۷	۴۵۷	-/۰.۲۳	۲۷۲۰۰	۱۹۷۰۰	-/۷۲۴	۴۵۳۸	۲۴۲/۳	-/۲۱۷
S <sub>13</sub>	۲۰	۴۰	۱۰۰/۸	۳۳۰	-/۰.۲۴	۲۵۶۰۰	۱۳۷۰۰	-/۵۲۵	۳۲۷۴	۱۶۸/۵	-/۲۳۴
S <sub>14</sub>	۲۰	۶۰	۱۰۱/۱	۴۴۹	-/۰.۲۵	۲۹۴۰۰	۱۸۰۰۰	-/۶۱۱	۴۴۴۱	۲۲۱/۴	-/۲۰۷
S <sub>15</sub>	۲۰	۸۰	۱۰۱/۴	۴۵۶	-/۰.۲۳	۲۹۳۰۰	۱۹۲۰۰	-/۶۵۷	۴۴۹۷	۲۳۶/۲	-/۲۱۵
S <sub>16</sub>	۲۰	۱۰۰	۱۰۱/۲	۴۶۷	-/۰.۲۳	۲۷۸۰۰	۲۰۰۰۰	-/۷۲۲	۴۶۱۵	۲۴۶/۰	-/۲۲۷

نفوذ دندان در صفحات جانبی پروفیل است. در ناحیه‌ی ۴ به دلیل کوتاه شدن صفحات جانبی پروفیل و جمع‌شدگی صفحات روی هم تغییرات نمودار به صورت افزایشی است. در انتهای این ناحیه کماتش صفحات جانبی رخ می‌دهد که عامل پیدایش دومین بیشینه نسبی در نمودار نیرو جابه‌جایی است. در ناحیه ۵ به دلیل گذر از نقطه کماتش صفحات جانبی، نمودار روند نزولی خواهد داشت. در انتهای ناحیه ۵، به ازای یک کرنش مشخص که خود تابعی از قطر دندان است جسم به تدریج رفتار یک ماده‌ی صلب را از خود نشان می‌دهد و شیب نمودار به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد. از آنجا که ماده‌ی صلب جاذب انرژی مطلوبی نیست، رفتار ماده و جذب انرژی آن تا قبل از صلب شدن مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۴ به عنوان نمونه، روند تغییر شکل در دندان‌گذاری دو دندان با قطر و فاصله دندان به ترتیب

به دلیل تأثیر مستقیم مکانیزم تغییر شکل بر پارامترهای جذب انرژی، در این بخش به بررسی روند و چگونگی تغییر شکل نمونه‌ها تحت فرایند بارگذاری دندان‌های دو گانه پرداخته می‌شود. شکل ۳ نمودار نیرو جابه‌جایی نمونه S<sub>16</sub> را یک نمونه نوعی را نشان می‌دهد که از ناحیه‌های مختلفی تشکیل شده است. در ناحیه‌ی ۱، عمده تغییر شکل بصورت الاستیک بوده که انرژی این ناحیه برگشت‌پذیر است. در اکثر تئوری‌های ارائه شده برای محاسبه جذب انرژی، از این ناحیه به دلیل کوچک بودن مقدار سطح زیر منحنی و برگشت پذیر بودن انرژی صرف نظر می‌شود. در ناحیه‌ی ۲ روند تغییرات نمودار به صورت افزایشی بوده و نقطه بیشینه نمودار نیرو-جابه‌جایی در این ناحیه مربوط به کماتش صفحه‌ای است که با دندان در تماس است. پس از وقوع کماتش نمودار در ناحیه ۳ یک روند نزولی دارد که همراه با

یک جاذب به حالت ایده‌آل آن است. طبق شکل ۵ در حالی که از دندان‌ها با قطر ۸ میلی‌متر استفاده می‌کنیم، با افزایش فاصله بین دندان‌ها مقدار CFE کاهش می‌یابد و این به معنای دور شدن جاذب از حالت ایده‌آل است. در دندان‌گذاری دوگانه با قطرهای ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر، با افزایش فاصله بین دندان‌ها از ۳d تا ۵d، مقدار CFE افزایش و میزان افت در نمودار نیرو-جاب‌جایی کاهش می‌یابد و جاذب شرایط مطلوب‌تری خواهد داشت. مقدار CFE برای دندان‌ها با قطر ۱۲ میلی‌متر نوسانی بوده و از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند.

با توجه به شکل ۶ به ازای تمام قطرهای دندان، پارامتر SAE که بیانگر انرژی بر واحد جرم است، با افزایش فاصله بین دندان‌ها از ۲d تا ۵d یک روند صعودی دارد. یعنی با افزایش فاصله بین دندان‌ها در هر قطر، SAE افزایش می‌یابد. این بدین معنا است که در کاربردهایی که وزن سازه‌ی جاذب انرژی یک پارامتر مهم برای طراحی است، فاصله‌ی ۵d بیشترین مقدار جذب انرژی در حالت دندان‌گذاری با دو دندان را در شرایط وزنی یکسان برای نمونه‌ها

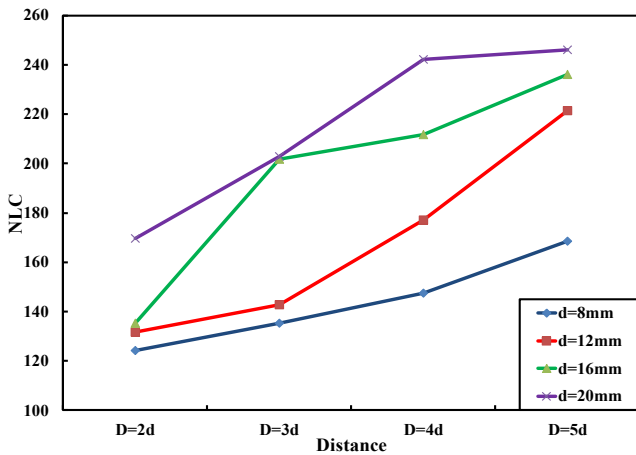


Fig. 7. The trend of NLC variations versus indenters distance in double-indentation

شکل ۷: روند تغییرات NLC بر حسب فاصله برای دندان‌گذاری با دودندان

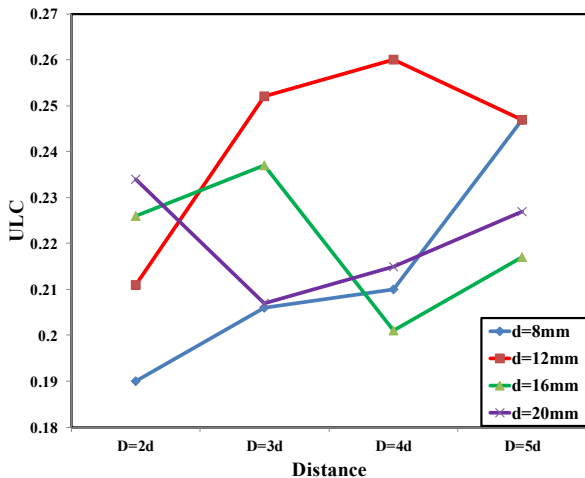


Fig. 8. The trend of ULC variations versus indenters distance in double-indentation

شکل ۸: روند تغییرات ULC بر حسب فاصله برای دندان‌گذاری با دودندان

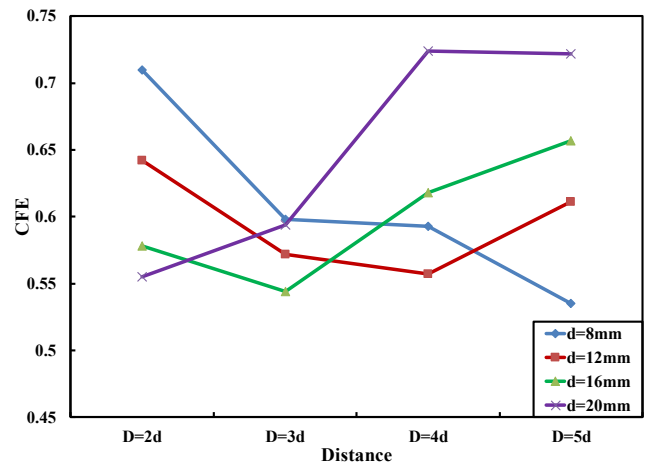


Fig. 5. The trend of CFE variations versus indenters distance in double-indentation

شکل ۵: روند تغییرات CFE بر حسب فاصله برای دندان‌گذاری با دودندان

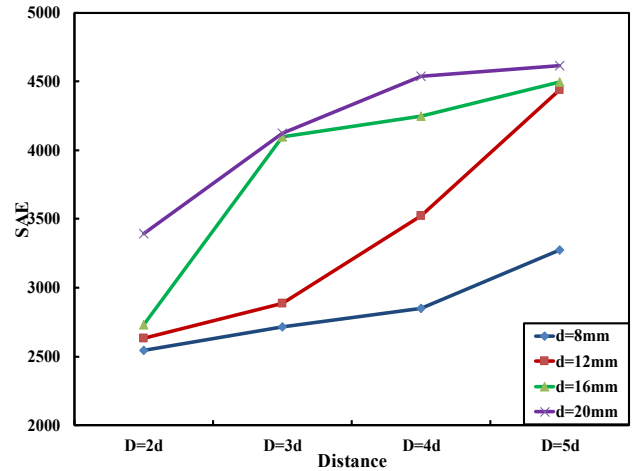


Fig. 6. The trend of SAE variations versus indenters distance in double-indentation

شکل ۶: روند تغییرات SAE بر حسب فاصله برای دندان‌گذاری با دودندان

۱۲ و ۳۶ میلی‌متر در حین بارگذاری دندان‌های نشان می‌دهد.

از میان پارامترهای تعریف شده در بخش ۲، پارامترهای اساسی انرژی جذب شده ویژه، راندمان نیروی برخورد، ظرفیت حمل بار بدون بعد و نوسان ظرفیت حمل بار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند که در جدول ۲، مقدار این پارامترها برای نمونه‌های تحت بارگذاری تک دندان ارائه شده است. در این جدول قطر دندان بر حسب میلی‌متر،  $m$  جرم نمونه بر حسب کیلوگرم و  $\delta$  میزان پیشروی دندان در نمونه بر حسب متر می‌باشد. در جدول ۳ پارامترهای جذب انرژی در حالت دندان‌گذاری با ۲ دندان ارائه شده است که در آن  $D$  فاصله‌ی مرکز دو دندان بر حسب میلی‌متر می‌باشد. با مقایسه مقادیر جدول‌های ۲ و ۳، بهبود تمام پارامترهای جذب انرژی در حالت دودندان نسبت به یک‌دندان مشهود است.

با توجه به تغییر پارامتر فاصله‌های دندان‌ها در حالت دودندان، در شکل‌های ۵ تا ۷ به بررسی نحوه‌ی تغییر پارامترهای جذب انرژی در حالت دودندان پرداخته شده است. پارامتر CFE به عنوان یک معیار برای نزدیکی

کلی یک روند افزایشی دارد. در دندان‌گذاری دو گانه برای هر قطر دندان، با افزایش فاصله بین دندان‌ها میزان انرژی افزایش می‌یابد و به میزان دو برابر انرژی دندان‌گذاری تکی نزدیک می‌شود. بیشترین انرژی جذب شده کل در نمونه  $S_{16}$  اتفاق می‌افتد که میزان انرژی جذب شده دو برابر حالت تک دندان با قطر ۲۰ میلی متر می‌باشد. عملاً بسته به قطر دندان، می‌توان با دور کردن دندان‌ها از یکدیگر اثر برهمکنش دندان‌ها روی یکدیگر را از بین برد و به مقدار دو برابر انرژی بارگذاری تک دندان نزدیک شد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های تجربی انجام شده می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که: با تغییر تعداد دندان از ۱ به ۲، به دلیل افزایش ناحیه‌ی لهدگی مقدار انرژی جذب شده‌ی کل ( $E_T$ ) بیشتر می‌شود که این موضوع می‌تواند در کاربردهای مختلف که میزان جذب انرژی بیشتری مورد نیاز است، مورد توجه قرار گیرد. کمترین افزایش انرژی جذب شده در حالت دو دندان در مقایسه با حالت یک دندان بسته به قطر دندان بین ۱۴ تا ۲۵ درصد است که مربوط به زمانی است که فاصله دندان‌ها دو برابر قطر دندان در نظر گرفته شد. از آنجا که اثر افزایش فاصله‌ی دندان‌ها مورد بررسی قرار گرفت، به منظور یکسان‌سازی شرایط آزمایش‌ها طول پروفیل‌ها را ۲۰۰ میلی متر در نظر گرفته شد تا بتوان با افزایش فاصله‌ی دندان‌ها نحوه‌ی برهم‌کنش دو دندان را مشاهده کرد. در حالت دودندانه‌ی، با افزایش فاصله‌ی دندان‌ها از  $2d$  تا  $5d$  (قطر دندان‌ها است) به ازای هریک از قطر‌ها، به دلیل افزایش ناحیه‌ی لهدگی و همچنین تشکیل لولای پلاستیک بزرگتر، جذب انرژی بیشتر و به حالت دو دندان مجزا نزدیک می‌شود. با افزایش فاصله از  $2d$  تا  $5d$  انرژی جذب شده‌ی کل ( $E_T$ ) در حدود ۲۶ تا ۴۱ درصد افزایش می‌یابد. البته با افزایش بیش از حد فاصله‌ی دندان‌ها و نزدیک شدن آنها به دو انتهای پروفیل انرژی جذب شده‌ی کل ( $E_T$ ) کاهش می‌یابد. در دندان‌گذاری با دو دندان با افزایش قطر دندان انرژی جذب شده‌ی کل ( $E_T$ ) افزایش می‌یابد و این افزایش انرژی چندان چشم‌گیر نیست. در دندان‌گذاری با دو دندان در ۶ حالت فاصله بین دندان‌ها ثابت است. اگر فاصله بین دو دندان ثابت در نظر گرفته شود، در ۴ مورد از این ۶ حالت، با افزایش قطر دندان انرژی جذب شده کل بیشتر می‌شود.

هر چه مقدار پارامتر CFE به ۱ نزدیک‌تر باشد جذب عملکردی بهتر خواهد داشت. در بارگذاری یک دندان‌های بیشترین مقدار CFE مربوط به قطر ۸ میلی‌متر است که بهبود آن نسبت به قطر ۱۶ میلی‌متر ۶ درصد می‌باشد. در دندان‌گذاری با دو دندان بهترین عملکرد از نظر پارامتر CFE مربوط به نمونه  $S_{16}$  است که بهبود آن نسبت به دندان‌گذاری تک دندان با قطر ۲۰ میلی‌متر ۷ درصد بهبود این پارامتر مشاهده می‌شود. پارامتر جذب انرژی NLC که بیانگر ظرفیت حمل بار بدون بعد است در دندان‌گذاری با یک دندان رفتار نوسانی دارد. در دندان‌گذاری با یک دندان، عملکرد NLC در قطر ۱۲ میلی‌متر بهتر از سایر نمونه‌ها است که نسبت به نمونه با قطر

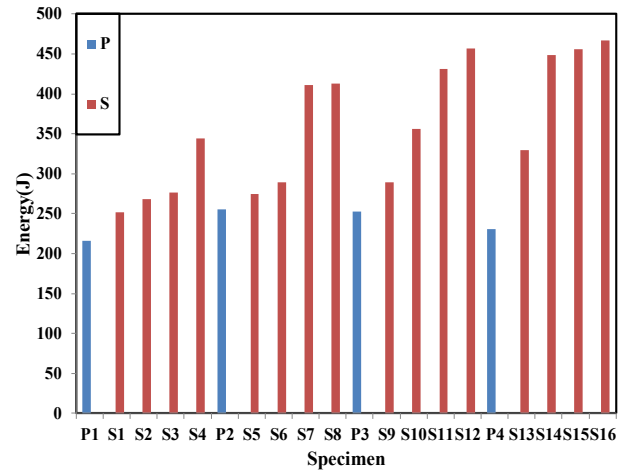


Fig. 9. The amount of total absorbed energy for tested specimens  
شکل ۹: میزان انرژی جذب شده کل برای نمونه‌های آزمایش شده

دارد. نمودار SAE برای دندان‌ها با قطرهای ۸، ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر تقریباً از یک نقطه شروع می‌شود ولی تغییرات شیب در دندان ۸ میلی‌متر از دو حالت ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر کمتر است. با توجه به این شکل، نمونه  $S_{16}$  با دندان با قطر ۲۰ میلی‌متر و فاصله  $5d$  بهترین مقدار SAE را دارد.

از آن جا که در کلیه آزمون‌ها مقدار ضخامت پروفیل‌ها و تنش تسلیم یکسان است، پس مقدار گشتاور خمشی طبق رابطه‌ی (۸) برای تمام نمونه‌ها ثابت است. با توجه به شکل ۷ در حالت دودندانه و به ازای تمامی قطرهای ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر، مقدار NLC با افزایش فاصله بین دندان‌ها بیشتر می‌شود و طبق رابطه‌ی (۷) این افزایش مقدار NLC با توجه به ثابت بودن مقدار گشتاور خمشی پلاستیک، به معنای افزایش مقدار نیروی میانگین است. یعنی با افزایش فاصله‌ی دندان‌ها، مقدار نیروی میانگین بیشتر می‌شود و این به معنای افزایش سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی و در نتیجه افزایش انرژی جذب شده کل است.

در شکل ۸ نمودار تغییرات ULC برای نمونه‌های آزمایش شده ترسیم شده است. مقدار این پارامتر هرچه از ۱ کوچک‌تر باشد جذب انرژی بیشتری داریم. تغییرات این پارامتر برای قطر ۸ میلی‌متر به صورت صعودی است که منجر به فاصله گرفتن از جذب ایده‌آل است. با افزایش فاصله دندان‌ها برای قطر ۲۰ میلی‌متر، روند تغییرات این پارامتر مانند قطر ۸ میلی‌متر صعودی است و جذب رفتار نامطلوبی دارد. برای قطرهای ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر رفتار ULC نوسانی است. از نظر این پارامتر، بهترین نمونه‌ها  $S_1$  و  $S_{11}$  می‌باشند. انرژی جذب شده کل برای نمونه  $S_{11}$ ، ۴۱٪ بهتر از نمونه  $S_1$  است. در نتیجه بهترین نمونه از نظر پارامتر ULC، نمونه  $S_{11}$  با قطر دندان ۱۶ و فاصله ۶۴ میلی‌متر می‌باشد.

انرژی جذب شده کل برابر با سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی است. در شکل ۹ مقدار انرژی جذب شده کل برای نمونه‌های آزمایش شده ترسیم شده است. در حالت‌هایی که قطر ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر است، با افزایش قطر دندان به دلیل افزایش سطح تماس دندان و نمونه انرژی جذب شده در حالت



علائم یونانی

$\delta$	طول جابه‌جا شده (m)
$\rho$	چگالی جاذب ( $\text{kg/m}^3$ )

مراجع

- [1] A. Alghamdi, Collapsible impact energy absorbers: an overview, *Thin-walled structures*, 39(2) (2001) 189-213.
- [2] S.V. Hosseini, J. Zamani, A. Darvize, M. Soleimani, An experimental and numerical analysis of mechanical and geometrical characteristics effect on crush loading of square energy absorbers under axial loading, *Mechanic and Aero Space*, 2(2) (2006) 1-10 (in Persian).
- [3] C. Karroum, S.R. Reid, S. Li, Indentation of ring-stiffened cylinders by wedge-shaped indenters—Part 1: An experimental and finite element investigation, *International journal of mechanical sciences*, 49(1) (2007) 13-38.
- [4] W. Johnson, A. Walton, Protection of car occupants in frontal impacts with heavy lorries: Frontal structures, *International Journal of Impact Engineering*, 1(2) (1983) 111-123.
- [5] W. Johnson, A. Walton, An experimental investigation of the energy dissipation of a number of car bumpers under quasi-static lateral loads, *International Journal of Impact Engineering*, 1(3) (1983) 301-308.
- [6] J.D. Reid, D.L. Sicking, Design and simulation of a sequential kinking guardrail terminal, *International journal of impact engineering*, 21(9) (1998) 761-772.
- [7] Y. Kanae, T. Sasaki, S. Shimamura, Experimental and analytical studies on the drop-impact test with lead-shielded scale model radioactive material shipping casks, in: *Structural impact and crashworthiness*. Volume 2, 1984.
- [8] A. Alghamdi, *Protection of Saudi descent roads using metallic collapsible energy absorbers*, Final Report Submitted to KACST, Riyadh, Saudi Arabia, Grant, 98(2) (2000) 74.
- [9] L. Mirfendereski, M. Salimi, S. Ziaei-Rad, Parametric study and numerical analysis of empty and foam-filled thin-walled tubes under static and dynamic loadings, *International Journal of Mechanical Sciences*, 50(6) (2008) 1042-1057.
- [10] S. Reid, Metal tubes as impact energy absorbers, in: *Metal forming and impact mechanics*, Elsevier, 1985, pp. 249-269.
- [11] A.A. Nia, H. Badnava, K.F. Nejad, An experimental investigation on crack effect on the mechanical behavior and energy absorption of thin-walled tubes, *Materials &*

۸ میلی‌متر بهبود آن ۱۵ درصد می‌باشد. در دندان‌گذاری دو دندان‌های روند تغییرات NLC مشابه با SAE است. بیشترین و کمترین مقدار NLC در دندان‌گذاری دو گانه به ترتیب متعلق به نمونه‌های  $S_{16}$  و  $S_1$  است. افزایش عملکرد NLC در نمونه  $S_{16}$  نسبت به  $S_1$ ، ۴۹ درصد و نسبت به دندان‌گذاری با یک دندان با قطرهای ۸ و ۱۲ میلی‌متر به ترتیب ۵۲ و ۴۳ درصد است. پارامتر ULC بیانگر میزان نوسانات حمل بار است. مقدار این پارامتر هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، جاذب عملکرد بهتری دارد. در دندان‌گذاری با یک دندان روند تغییرات ULC نوسانی و بیشترین و کمترین مقدار آن متعلق به نمونه‌ها با قطر ۱۶ و ۸ میلی‌متر است. مقدار ULC در بارگذاری تک دندان‌های در نمونه با قطر ۸ میلی‌متر ۴ درصد بهتر از قطر ۱۶ میلی‌متر می‌باشد. در دندان‌گذاری دوگانه نیز رفتار ULC با افزایش قطر و فاصله بین دندان‌ها، نوسانی بوده و بیشترین و کمترین مقدار آن به ترتیب متعلق به نمونه‌های  $S_1$  و  $S_7$  با مقدارهای ۰/۲۶۰ و ۰/۱۹۰ می‌باشد. در تمامی نمونه‌های آزمایش شده بهترین مقدار ULC متعلق به نمونه  $P_1$  (دندان‌گذاری تک دندان با قطر ۸ میلی‌متر) بوده و نسبت به تمامی حالت‌های بارگذاری دو دندان ۱۸ تا ۴۰ درصد بهبود این پارامتر مشاهده می‌شود.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

$A$	مساحت ( $\text{m}^2$ )
$a$	ابعاد پروفیل (m)
CFE	راندمان نیروی برخورد (بی‌بعد)
$D$	فاصله بین مراکز دندان‌ها (m)
$D$	قطر دندان (m)
$ds$	محور مختصات در راستای جابه‌جایی (m)
$E_t$	انرژی کل (J)
EEA	اثربخشی جذب انرژی (بی‌بعد)
ESR	نسبت پیشروی مؤثر (بی‌بعد)
$L$	طول نمونه (m)
$M_0$	گشتاور خمشی پلاستیک (Nm)
$M$	جرم جاذب (kg)
NLC	ظرفیت حمل بار (بی‌بعد)
$P$	بار (نیرو) لحظه‌ای (N)
$P_{ave}$	بار (نیرو) میانگین (N)
$P_{cr}$	نیروی بیشینه (N)
SAE	انرژی جذب شده ویژه (بی‌بعد)
$T$	ضخامت نمونه (m)
$V$	حجم جاذب ( $\text{m}^3$ )
$Y$	تنش تسلیم (Pa)

- [17] D.C. Brooker, A numerical study on the lateral indentation of continuously supported tubes, *Journal of Constructional Steel Research*, 60(8) (2004) 1177-1192.
- [18] A.-G. Olabi, E. Morris, M. Hashmi, Metallic tube type energy absorbers: a synopsis, *Thin-walled structures*, 45(7-8) (2007) 706-726.
- [19] F. Hafeez, F. Almaskari, Experimental investigation of the scaling laws in laterally indented filament wound tubes supported with V shaped cradles, *Composite Structures*, 126 (2015) 265-284.
- [20] E. ASTM, 8M. Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials (Metric), Annual Book of ASTM Standards, in: *Am Soc Testing Mater*, 1999, pp. 01.
- [21] Y. Xiang, T. Yu, L. Yang, Comparative analysis of energy absorption capacity of polygonal tubes, multi-cell tubes and honeycombs by utilizing key performance indicators, *Materials & Design*, 89 (2016) 689-696.
- Design*, 32(6) (2011) 3594-3607.
- [12] K. Johnson, The correlation of indentation experiments, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 18(2) (1970) 115-126.
- [13] V.-W. Shim, W. Stronge, Lateral crushing of thin-walled tubes between cylindrical indenters, *International journal of mechanical sciences*, 28(10) (1986) 683-707.
- [14] G. Lu, A study of the crushing of tubes by two indenters, *International journal of mechanical sciences*, 35(3-4) (1993) 267-278.
- [15] T. Wierzbicki, M. Suh, Indentation of tubes under combined loading, *International Journal of Mechanical Sciences*, 30(3-4) (1988) 229-248.
- [16] C. Kardaras, G.X. Lu, Finite element analysis of thin walled tubes under point loads subjected to large plastic deformation, in: *Key engineering materials, Trans Tech Publ*, 2000, pp. 733-738.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

J. Rouzegar , M. R. Keshavarz, H. Assaee, Experimental Study of Energy Absorption of Square Column under Multi-Indentation Loading, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 51(1) (2018) 33-42.

DOI: 10.22060/mej.2017.13274.5589

